

多波束系统在 500 kV 福港线海底电缆路由地形变化分析中的应用

邓卫红, 刘凡

(中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663)

摘要: [目的]500 kV 福港线海底电缆路由为跨越琼州海峡连通海南省与大陆的唯一高压电缆通道, 由于峡区水流急, 过往船舶多, 渔民活动频繁, 船舶随意抛锚现象严重, 如果裸露和悬空的电缆受到外力作用会发生弯曲变形, 变形过大将损坏电缆内部构造, 重则导致电缆断裂, 因此, 及时掌握海缆路由上方的地形变化尤为重要, 降低安全隐患。[方法]论述了采用多波束系统扫测海底电缆路由地形, 根据历次采集的海量数据, 通过 Kriging 插值方法生成 DEM 模型, 并比较数据间的高程值和等值线变化, 分析海底电缆路由上方的地形冲刷演变过程和沙波迁移趋势。[结果]通过数据分析, 多波束系统在海底地形冲刷和微地貌演变分析中具有数据量大、点间距小、精度高等特点, 能很好掌握变化趋势。[结论]对于水流急、海底地形复杂的海工构筑物, 建议定期采用多波束系统对周围地形地貌进行扫测, 掌握有机载体的变化趋势, 为海工构筑物的保护措施提供数据依据, 将破坏概率降至最低, 确保正常运营之目的。

关键词: 海底电缆; 多波束系统; Kriging 插值方法; 冲刷; 淤积; 演变

中图分类号: TM7 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-8676(2019)S1-0119-05

Application of Multibeam System in the Analysis of the Terrain Change of the 500 kV Fugang High-voltage Submarine Cable

DENG Weihong, LIU Fan

(China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

Abstract: [Introduction]The 500 kV Fugang Line submarine cable route is the only high-voltage cable channel connecting Hainan Province and the mainland across the Qiongzhou Strait. Due to the rapid flow of water in the Strait, number of ships pass through, the fishermen have frequent activities, and fishermen's random anchoring is serious. If the exposed or suspended cables are subjected to external forces, they will be bent and deformed. If the deformation is too large, the internal structure of the cable will be damaged and seriously lead to cable fracture. [Method]This article discussed the use of Multibeam System to scan submarine cable routing terrain, according to the massive data collected in the past. The Kriging interpolation method was used to generate the DEM model and compared the elevation values of both. Analyzed the evolution of terrain and the trend of sand wave. [Result]The Multibeam System has the characteristics of large data volume, small dot spacing and high precision in the analysis of submarine terrain scouring and micro-geomorphology evolution, which can well grasp the changing trend. [Conclusion]For offshore structures with complex water flow and complex seabed topography, it is recommended to use a Multibeam System to regularly scan the surrounding terrain, master the trend of organic carriers, provide data basis for the protection measures of offshore structures and minimize the probability of damage to ensure normal operation.

Key words: submarine cable; multibeam system; kriging interpolation method; scour; sedimentation; evolution

为了实现海南省高压输电线路与大陆连接,

优化电力资源调度利用, 于 2009 年 6 月, 南方电网有限公司投资建成跨海高压输电海缆。电缆路由走向自南向北横穿琼州海峡, 长度约 31 km, 为联通海南省与大陆间的电网唯一通道, 其意义

及重要性显而易见^[1-2]。琼州海峡属于重要航道，同时也是渔民捕捞作业活动频繁的海域，据有关部门统计，每年过往琼州海峡轮船13万艘，外轮2000余艘^[3]；过往船舶擅自抛锚和频繁的渔业活动严重威胁海底电缆安全，故于2009年和2011年负责海缆管理的职责部门分别对海缆路径采取了保护措施，对部分区段海缆进行了抛石及徐闻侧海域采用铸铁套管的方式进行了海缆保护^[4]。为了减少海缆裸露的危险，加强对海缆周围地形地貌的监控，应项目管理者要求，笔者单位采用多波束系统对海缆路由走廊进行了三次扫测，分别为2010年、2013年、2015年，根据获得的水深点云数据，结合内业软件分析海缆路由冲淤幅度较大和沙波位移较大的区段，为海缆保护提供技术支撑。电缆路由所在位置示意图如图1所示。



图1 500 kV 福港线海底电缆位置

Fig. 1 500 kV Fugang line submarine cable location

1 电缆路由所处的海洋环境

500 kV 福港线海缆路由所处的海洋环境具有以下特点：(1)琼州海峡基本上是个潮流通道，中央深水区域更是受潮流强烈冲刷的地方，根据权威部门监测数据，海峡最大流速达1.4 m/s(底层)~1.83 m/s(表层)^[5]；(2)海底表层沉积物类型多样：与潮流的流速有很大关系，中央区域水流急，形成的海底表层堆积物颗粒较粗，向北呈粗一细一粗变粗的趋势，向南逐渐变细；(3)地貌环境多变：测区北部地形变化平缓，无明显的沟壑及斜坡等不良地形，南岭村端至15 m水深坡降大致为0.09°；15 m至85 m水深处，地形急剧下降，坡度较大，大致为2°；85 m至海南端40 m

水深区域，地形破碎，沙波、斜坡、陡坎较多，地形高低起伏变化大，水深较深，最深处达110 m，坡度最大值为28.8°；40 m至35 m测区段，地形相对较平坦；海南登陆端地形急剧上升，水深从35 m至6 m坡度为4.6°。海缆路由地貌分布如图2所示。

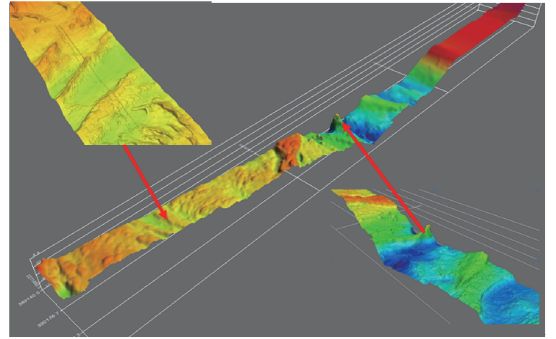


图2 海底电缆路由地形三维视图

Fig. 2 3D view of submarine cable routing terrain

为了掌握海缆路由地形的冲刷情况，2010年至2015年分别采用多波束系统对海缆上方的地形进行了扫测，扫测宽度为海缆路由由左右各约300 m，并根据多波束扫测的点云数据对比分析，研究路由区的海床稳定性，分析路由由附近地形近几年的海床冲淤演变；同时，根据地形冲淤演变数值结合海缆埋设深度判断海缆的覆盖层厚度变化，为海缆的保护工作设计提供科学根据，避免海缆出现裸露悬空，减少危害海缆的不利因素。

2 投入的仪器设备

为了分析福港线海缆路由的海床冲淤变化和地貌变化趋势，投入的设备具有精度高、测量值可靠、稳定等特性，选用的设备如表1所示：

表1 多波束系统配置一览表

Tab. 1 Multi-beam system configuration list

设备名称	主要性能	备注
多波束	最大量程：500 m；量程分辨率： 1.25 cm； 波束大小：0.5°×1°； 工作频率：200~400 kHz，20多 个频率值可选； 波束数目：256个@等角方布， 1300个@等距分布	SONIC 2024
声速剖面仪	声速测量精度为+/-0.03 m/s	SV Plus V2
声速测量仪	声速测量精度：0.050 m/s	Smart SV

表 1 (续) 多波束系统配置一览表
Tab. 1 (Cont.) Multi-beam system configuration list

设备名称	主要性能	备注
光纤罗经	航向动态精度 0.1°; 稳定时间(静态) < 1 mn; 升沉、横摆、纵摆精度为 5 cm 或 5%; 横滚、俯仰、动态精度: 0.01°	OCTANS III
导航定位系统	水平 10 cm, 高程 15 cm 的差分精度	SF-3050

3 多波束系统工作概述

多波束测深系统工作时大致垂直航迹线方向同时发射数百个波束, 波束之间与换能器之间形成一个扇形区域, 借助姿态仪、罗经、GPS 测量的实时数据可以计算出每个波束的具体位置。由于单次发射的波束多, 采集的海底水深点密集, 以每秒发射 5 次(仪器最高可达 60 次/s), 单次发射 256 个波束计算, 理论上多波束系统工作一分钟就可采集 76 800 个水深数据, 密集的水深数据可以真实的、直观的反应海底地貌形态, 并普遍用于探测海底障碍物, 如海底电缆、渔礁、沉船、微地貌特征探测之用^[6]。正因多波束系统在海缆路由地形测量中的优势, 于 2010 年至 2015 年先后采用 R2 SONIC 2024 多波束系统对海缆路由地形进行了全覆盖扫测, 采集了路由上方的海量数据。测区南北跨度达 31 km, 路由区域地形复杂, 水深变化快, 为获得高质量海底地貌数据, 多波束系统扫测过程中对声速剖面的测量、潮位观测的合理性、多波束安装与校准的可靠性等重要环节进行把控, 确保获得高质量的数据^[7]。

4 海床稳定性分析

根据 2010 年、2013 年、2015 年的多波束系统测量的水深点云数据, 内业使用 Surfer 软件提供的 Kriging 插值方法进一步详细分析路由区的冲淤情况, 从而判断海缆周围地形地貌的稳定性, 并根据冲淤变化值, 结合电缆埋设深度, 初步判断电缆是否裸露悬空, 为后续电缆的埋深检测和维护提供技术支撑^[8], Kriging 插值方法应用面很广, 在插值过程中会注重考虑地形的空间连贯性, 使插值更接近真实值, 获取较高精度的水下高程数据^[9]。分析过程中, 首先根据不同年代测量的路由区真实水深

点离散数据生成具有相同面域的 DEM 模型, 然后比较不同阶段测量水深点的高程值, 根据高程值差值从而判断路由地形地貌的冲刷与淤积状态, 本文以 2015 年测量成果为参考, 2010 年、2013 年测量成果与之对比分析, 从而研究电缆路由海床的稳定性及冲淤程度, 并对重点地貌区域着重分析, 了解路由海底地形的稳定性, 分析过程中, 负值(蓝色)表示地形被冲刷, 正值(红色)表示地形淤积。详细分析如图 3 所示。

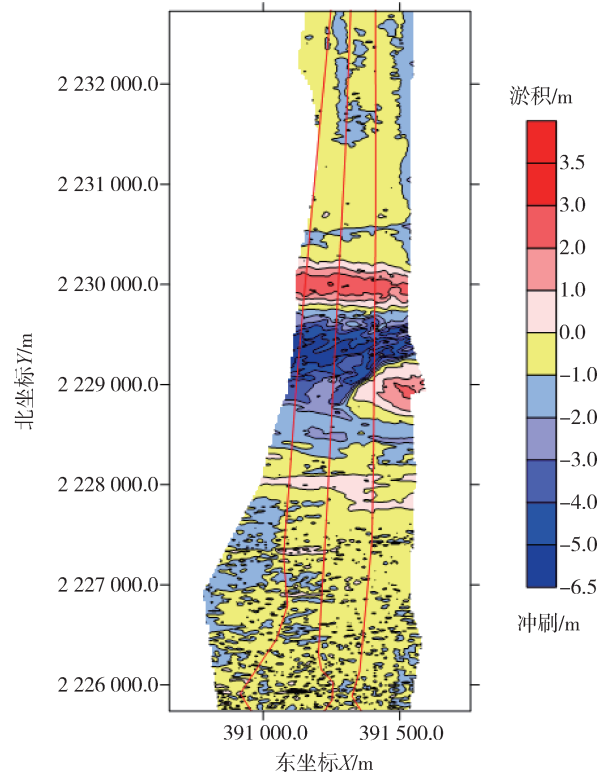


图 3 2010 年与 2015 年多波束扫测点云数据冲淤分析图
Fig. 3 Analysis of data from multi-beam measurements in 2010 and 2015 in scouring and silting

根据多波束系统不同阶段测量的点云数据分析, 2010 年至 2015 年间海缆路由区整体处于冲刷的状态, 大致平均冲刷厚度达 0.7 m, 最大冲刷区域位于路由北侧 12.1 KP 至 10.6 KP, 检测到的冲刷最大值为 6.1 m; 而从淤积情况来看, 淤积区域大概位于 10.6 KP 至 10.1 KP 区段, 大部分区域淤积幅度大于 1 m, 个别地段淤积厚度达 3.1 m。

2013 年至 2015 年间海缆路由区整体冲淤态势有所缓解, 沿线路由冲淤幅度整体都较小, 在徐闻侧至 7.6 KP 区段、14.6 KP 至海南登陆段大部分区域冲淤数值介于 -0.2 至 0.2 之间, 但在 14.6 KP

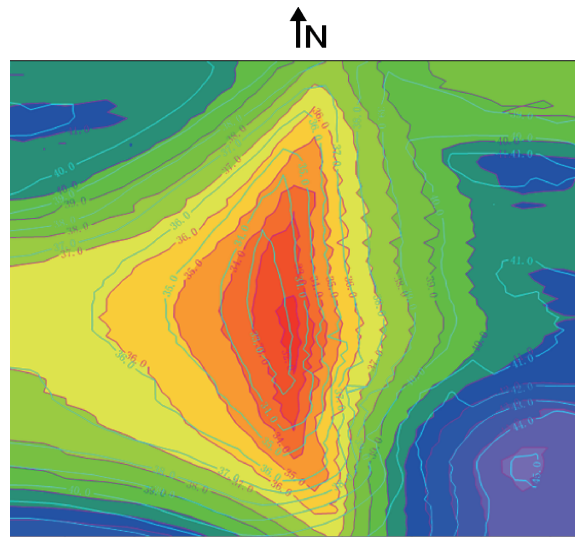
至 7.6 KP 区段存在较大面积的冲刷与淤积两种状况,位于 10.6 KP 至 9.1 KP 区段和 11.5 KP 至 11.2 KP 区段出现淤积现象,大部分区域淤积幅度小于 1 m,最大淤积厚度达 3 m;海缆路径 12 KP 至 10.3 KP 区段,水深在 15 m 至 80 m 范围内,地形基本处于冲刷趋势,整体冲刷厚度小于 1.5 m,但有些区域达 4 m;20.7 KP 至 20.2 KP 区域,水深介于 28 m 至 40 m 之间的斜坡区域,存在冲刷与淤积零星分布态势,测得的最大冲刷幅度大致为 2.2 m。总体来说,2013 年至 2015 年间的海底地形相对较稳定,冲淤幅度大部分区域介于 -0.2 至 0.2 m 之间,相对不稳定区域主要位于 14.6 KP 至 7.6 KP 区,存在分化现象。

5 微地貌稳定性分析

沙波、陡坎地貌基本在整个海缆路由区都出现,较大的沙波大体上为南北走向,根据有关资料记载,该区域的沙波波长一般在 100~400 m 之间,波高在 2~6 m 之间。

沙波的迁移势必对海缆安全造成很大的影响,迁移过程中会影响海缆覆盖层厚度的变化,导致埋深变浅、裸露悬空或埋深变厚等几种情形;陡坎地貌受水流冲刷容易产生侧滑、垮塌等现象,同样会造成横跨的海缆失去周围载体的支撑作用。针对本项目的需要,特意选择高精度导航定位设备(SF3050,平面精度优于 10 cm)为多波束系统提供定位服务,确保获得高精度的数据。分析微地貌的稳定性同样利用 2010 年、2013 年、2015 年多波束测量的点云数据,分别生成等高距为 1.0 m 的地形图,通过比较等值线的位移和高程值的变化,从而确定微地貌在形态上和空间上的变化^[10],具体比较过程如图 4 所示。

根据沙波、陡坎分析结果,可知大部分沙波整体较稳定,移动趋势不大,最大的为 7 m 左右,同时,陡坎边未发现坍塌现象。存在潜在危害的沙波主要有两处,一处位于 26.3 KP 至 26.6 KP 之间,横跨于电缆路径上方的地貌,坡顶有冲刷现象,2010 年测得的较高处仅在海缆路径附近有保留,且有继续冲刷现象;另一处位于 A 相电缆上方,北坐标 22.7 KP 至 22.4 KP 之间,该处地貌存在冲刷现象,如果继续冲刷,势必影响该处电缆的埋深。



注: — 2010年等高线; — 2013年等高线;
— 2015年等高线。

图4 福港线海缆路由某处沙波变化分析图

Fig. 4 Analysis of the sand wave movement on the Fugang cable route

6 结论

海缆敷设在海洋中,会遇到复杂的海洋环境(例如海底的高压环境、腐蚀环境和侵蚀环境等)、不同的海底地貌形态(沙波、海沟、海底山脉、海底丘陵以及裸露岩石等)、人类活动(捕捞区、锚区、军事区等)和海床不稳定性(海底冲刷区和移动沙波区等)等影响。在众多海缆安全影响因素中,由于恶劣的海底环境,导致海床不稳定性因素复杂多变,海床不稳定性因素对于海缆的危害性最大。本文主要讲述了利用多波束测深技术、高精度导航定位技术在海缆路由地形地貌扫测中的应用,并选用合适的内业处理分析软件,通过分析海缆路由区的历史测量数据,研究路由区海床的稳定性,对海床不稳定性因素进行全面的了解和分析,以达到尽可能避免不利因素,提前对冲刷和淤积幅度较大的区段提出预警,为海缆的保护措施提供数据依据,将海缆破坏概率降至最低,确保正常运营之目的。

多波束系统在海底地形冲刷和微地貌演变分析中具有数据量大、点间距小、精度高等特点,能很好地掌握变化趋势。本区域 2016 年对海缆的埋设深度做了详细调查,投入 DP(动力定位)船、ST 200 ROV、TSS350 管线探测仪、潜水员、水下摄像系统等设备,根据调查结果显示海缆埋深变浅及出

现裸露悬空的区段均出现在海底地形冲刷幅度较大的区段, 与多波束系统扫测的点云数据分析结果大致相同。

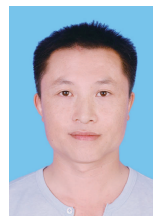
参考文献:

- [1] 梅小卫, 何才豪, 黄小卫. 海南联网工程海底电缆路由海面监控方案研究 [J]. 中国水运, 2011(11): 86-87+89.
MEI X W, HE C H, HUANG X W. Research on sea surface monitoring scheme for submarine cable routing in Hainan networking project [J]. China Water Transport, 2011(11): 86-87+89.
- [2] 赵远涛, 罗楚军, 李健, 等. 海南联网工程海底电缆风险分析 [J]. 中国电机(技术版), 2014(10): 70-73.
ZHAO Y T, LUO C J, LI J, et al. Risk analysis of submarine cables in Hainan networking project [J]. China Electric Power (Technology Edition), 2014(10): 70-73.
- [3] 杜涛宇. 海缆运维巡视及应急处置移动终端的应用研究 [J]. 机电信息, 2016(33): 39-40.
DU T Y. Application research of mobile terminal patrol and emergency handling mobile terminal [J]. Mechanical and Electrical Information, 2016(33): 39-40.
- [4] 何才豪, 莫林涛. 海南联网工程 500 kV 海底电缆路由检测技术的研究与应用 [J]. 中国电机(技术版), 2015(9): 30-36.
HE C H, MO L T. Research and application of 500 kV submarine cable route detection technology in Hainan network engineering [J]. China Electric Power(Technology Edition), 2015(9): 30-36.
- [5] 王宁, 高东明. 海南联网系统海缆监视告警区风险预控要素研究 [J]. 机电信息, 2015(24): 11-12.
WANG N, GAO D M. Research on risk pre-control elements of submarine cable monitoring and warning area in Hainan networked system [J]. Mechanical and Electrical Information, 2015(24): 11-12.
- [6] 邓卫红, 汤坚. GPS RTK 加装秒脉冲触发模块在多波束系统中的应用研究 [J]. 南方能源建设, 2017, 4(增刊 1): 97-100+106.
DENG W H, TANG J. GPS RTK install with pulse trigger module in the application research of multibeam system [J].

Southern Energy Construction, 2017, 4 (Supp. 1): 97-100+106.

- [7] 中华人民共和国交通运输部. 多波束测深系统测量技术要求: JT/T 790—2010 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Technical requirements for multibeam echosounder system surveying: JT/T 790—2010 [S]. Beijing: China Communications Press, 2011.
- [8] 鲁平泉, 金侃. 利用 ArcGIS 和 Surfer 进行水下地形分析 [J]. 中国水运, 2014(8): 116-117.
LU P Q, JIN K. Underwater terrain analysis using ArcGIS and Surfer [J]. China Water Transport, 2014(8): 116-117.
- [9] 包世泰, 廖衍旋, 胡月明, 等. 基于 Kriging 的地形高程插值 [J]. 地理与地理信息科学, 2007(3): 28-32.
BAO S T, LIAO Y X, HU Y M, et al. Terrain interpolation based on kriging method [J]. Geography and Geo-information Science, 2007(3): 28-32.
- [10] 曹俊茹, 刘强, 姚吉利, 等. 基于 Kriging 插值 DEM 的计算土方量方法的研究 [J]. 测绘科学, 2011(3): 98-99.
CAO J R, LIU Q, YAO J L, et al. Method of calculating earthwork based on the DEM of kriging interpolation [J]. Science of Surveying and Mapping, 2011(3): 98-99.

作者简介:



DENG W H

邓卫红(通信作者)

1978-, 男, 湖南汝城人, 高级工程师, 学士, 主要从事海洋工程勘测、工程测量等工作 (e-mail) 13602751990@163.com。

刘凡

1979-, 男, 湖南绥宁人, 高级工程师, 学士, 主要从事工程勘测、变形监测等工作(e-mail)15692323@qq.com。

(责任编辑 李辉)